

СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ АУДИОМАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЭКСПРЕСС-ЗОНДИРОВАНИЙ

В. А. Давыдов

Methods of developing audio-magnetotelluric express soundings

V. A. Davydov

Audio-magnetotelluric soundings (AMTS) are related to high frequency modification of magnetotelluric methods. In order to research low depths (up to 100-200 m) methods of audio-magnetotelluric and magnetic-variation measurements in motion were developed, or with short stops that was called AMTS express-survey. The purpose of the presented work is to determine the information value of various methods of quality and quantitative processing of audio-magnetotelluric (AMT) express-zonings. AMT-measurements in traditional and express options are given for this purpose on the controlled geophysical polygon. The comparison showed that the end results of both options of receiving data do not have great differences. Registered information contains all the necessary data on changing of electrical properties of the cut-section with the depth which allowed to build frequency and depth based cut-sections of various electrical magnetical parameters of the environment and to carry out 1D-2D inversion. Main provisions of the method, applied equipment, brief methods of field works and charts of office analysis of audio-magnetotelluric data are given in the work. Comparison of AMT processing results of express soundings with the present geological-geophysical information showed good convergence both in case of 1D-2D inversion, and in case of qualitative plottings of transformative cut-sections of audio-magnetotelluric and geomagnetic-variation parameters. Specific distinctions of one dimensional and two dimensional geoelectrical cut-sections of vertical electrical soundings (VES) and AMTS were emphasized. It was noted that various types of cut-sections have various characteristics. In order to increase the informative value it is recommended to use both quantitative as well as qualitative options of mapping. Using express option of AMT sounding with fast interpretation in field conditions allows to considerably increase the productivity of electrical magnetical methods of research during prospecting and exploratory drilling geotechnical works.

Keywords: audio-magnetotelluric sounding; AMTS; impedance; longitudinal conductance; tipper; inversion; geoelectrical cut section.

Аудиомагнитотеллурические зондирования (АМТЗ) относятся к высокочастотной модификации магнитотеллурических методов. Для изучения небольших глубин (до 100–200 м) ранее была разработана методика аудиомагнитотеллурических и магнитовариационных измерений в движении или с короткими остановками, названная экспресс-съёмкой АМТЗ. Целью представленной работы является определение информативности различных способов качественной и количественной обработки аудиомагнитотеллурических (АМТ) экспресс-зондирований. Для этого на контрольном геофизическом полигоне проведены АМТ-измерения в традиционном и экспрессном вариантах. Сравнение показало, что конечные результаты двух способов получения данных не имеют существенных отличий. Регистрируемая информация содержит все необходимые сведения об изменении электрических свойств разреза с глубиной, что позволило построить частотные и глубинные разрезы различных электромагнитных параметров среды и провести 1D–2D-инверсию. В работе приведены основные положения метода, применяемая аппаратура, краткая методика полевых работ и граф камеральной обработки аудиомагнитотеллурических данных. Сопоставление результатов АМТ-обработки экспресс-зондирований с имеющейся геолого-геофизической информацией показало хорошую сходимость как в случае 1D–2D-инверсии, так и в случае качественных построений трансформированных разрезов аудиомагнитотеллурических и магнитовариационных параметров. Выделены характерные отличия одномерных и двумерных геоэлектрических разрезов вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) и АМТЗ. Отмечено, что на разных типах разрезов проявляются различные особенности. Для повышения информативности зондирований рекомендуется применение как количественных, так и качественных вариантов построений. Использование экспресс-варианта АМТЗ с быстрой интерпретацией в полевых условиях позволяет значительно повысить производительность электромагнитных методов исследований при поисково-разведочных, инженерно-геологических и гидрогеологических работах.

Ключевые слова: аудиомагнитотеллурические зондирования (АМТЗ); импеданс; продольная проводимость; типпер; инверсия; геоэлектрический разрез.

Введение
Аудиомагнитотеллурические зондирования (АМТЗ) являются модификацией метода магнитотеллурических зондирований (МТЗ) и относятся пока к мало распространенным методам геофизических исследований. Специфика их развития обусловлена средней глубиной и сильным влиянием промышленных помех. В то же время метод уже хорошо зарекомендовал себя при поисках кимберлитовых трубок [1], рудных месторождений [2], пресных и термальных вод [3–5], появились данные об опробовании АМТЗ на углеводородное сырье [6]. Методика проведения работ и обработки материалов, требующая длительных многокомпонентных измерений на каждой точке, перешла от МТЗ. Глубина исследований в магнитотеллурических (МТ) методах напрямую зависит от периода измерений, достигая десятков километров при суточных наблюдениях. Информация о небольших глубинах (до 100–200 м) содержится в высокочастотном аудиодиапазоне (более 100 Гц), где время наблюдений можно сократить до нескольких секунд и даже проводить АМТ-съёмку в движении [7]. Упрощенная методика полевых работ приводит к сокращению данных и отражается на качестве получаемого материала. Для достоверной интерпретации таких экспресс-зондиро-

ваний может потребоваться применение других подходов к обработке. При этом на первом этапе достаточно иметь общее представление об однородности разреза и наличии аномалий электропроводности путем проведения качественной интерпретации. Для получения результатов о глубине залегания и удельном электрическом сопротивлении (УЭС) слоев, слагающих разрез, проводят количественную интерпретацию путем 1D–2D-инверсии аудиомагнитотеллурических (АМТ) данных. Целью данной работы является определение информативности различных способов качественной и количественной обработки аудиомагнитотеллурических экспресс-зондирований. К основным задачам исследований относятся получение и сопоставление трансформированных разрезов различных АМТ-параметров с 1D–2D-геоэлектрическими разрезами электромагнитных зондирований.

Основные положения

Главным параметр, рассчитываемый в результате проведения МТЗ и АМТЗ, – это импеданс Z , или входное сопротивление среды, равное отношению горизонтальных составляющих напряженности электрического E и магнитного H полей. В методе МТЗ для получения информации об электропроводности геологической среды обычно используется полный тензор импеданса с одновременным измерением четырех составляющих электромагнитного поля E_x, E_y, H_x, H_y , ориентированных в направлениях запад–восток X и юг–север Y [8]. Чтобы воспользоваться магнитовариационными характеристиками, дополнительно к этому включают измерение вертикальной составляющей магнитного поля H_z . Тензор импеданса дает возможность оценить характер и степень геоэлектрической неоднородности среды. В случае использования двухканальной аппаратуры осуществляются последовательные измерения основных компонент взаимного импеданса среды:

$$Z_{xy} = E_x / H_y; Z_{yx} = E_y / H_x.$$

Для АМТЗ, в отличие от МТЗ, не требуются длительных измерений на точке, поэтому общая потеря производительности невысокая и оправдывается компактностью аппаратуры и малым весом оборудования. Для вычисления импеданса в общем виде используется следующая формула:

$$Z = (U_e / U_m)(g/h_l),$$

где U_e – напряжение на выходе электрического канала, мВ; U_m – напряжение на выходе магнитного канала, мВ; g – чувствительность магнитного датчика, В/(А/м); h_l – действующая длина электрической приемной линии, м.

Получив значения импедансов, можно рассчитать кажущиеся удельные электрические сопротивления ρ_{xy}, ρ_{yx} и фазовые углы φ_j по формулам:

$$\rho_{xy} = |Z_{xy}|^2 / (2\pi f \mu_0); \rho_{yx} = |Z_{yx}|^2 / (2\pi f \mu_0);$$

$$\varphi_j = \arg Z = \varphi_{E_x} - \varphi_{H_y} = \varphi_{E_y} - \varphi_{H_x} + 180^\circ,$$

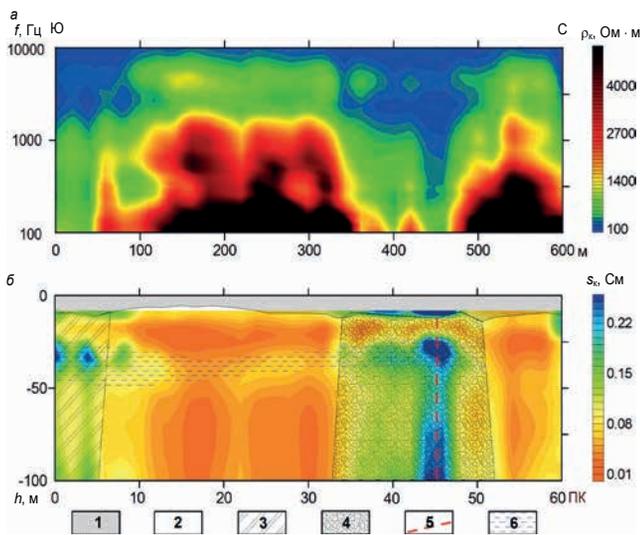


Рисунок 1. Качественные разрезы экспрессных АМТЗ. а – частотный псевдоразрез кажущихся сопротивлений; б – глубинный разрез кажущейся продольной проводимости; 1 – сулгинки коры выветривания; 2 – габбро; 3 – зона трещиноватости; 4 – зона дробления; 5 – глубинный разлом; 6 – трещинные воды.

где f – частота электромагнитного поля, Гц; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

Амплитудные и фазовые кривые АМТЗ являются, по существу, частотными характеристиками геоэлектрического разреза и отражают изменение электрических свойств среды с глубиной. Высокочастотные вихревые поля концентрируются в верхней части разреза, с понижением частоты глубина проникновения поля растет и кажущееся сопротивление начинает нести информацию о все более глубоких слоях. Полученные данные служат основой для качественной и количественной интерпретации результатов АМТЗ. Для решения оперативных производственных задач вполне достаточно получения импеданса среды в одном направлении (по линии профиля). Данная технология является распространенной практикой при поисках подземных вод [9]. В этом случае для измерения электрической составляющей поля вдоль профиля удобно использовать незаземленную стелющуюся линию, при этом магнитный датчик направлен поперек профиля. Предложенная методика работ позволяет проводить наблюдения аудиоманнитотеллурических компонент поля в движении (АМТ-съемка) или с короткими остановками (АМТ-экспресс-зондирования).

Методика работ

Для тестирования аппаратуры и сопоставления результатов работ разными методами в Институте геофизики УрО РАН давно используется контрольный полигон. Геофизический полигон находится на территории старого золоторудного месторождения в районе контакта двух интрузивных массивов – габбро и гранитов. Основной профиль пересекает разлом с зоной дробления и метасоматическими изменениями пород. Территория повсеместно перекрыта слоем рыхлых отложений (5–10 м и более), состоящих из элювиально-делювиальных сулгинков коры выветривания коренных пород. На полигоне пробурены одна инженерно-геологическая скважина (12 м) и три гидрогеологических скважины глубиной более 50 м. При изучении полигона применялись гравимагнитная съемка, малоглубинная сейсморазведка, радиометрия и электроразведка. Электромагнитные исследования на контрольном профиле перед постановкой АМТЗ включали вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) и дистанционные индукционные зондирования (ДИЗ) с вертикальным магнитным диполем.

Аудиоманнитотеллурические зондирования проводились с помощью двухканальной приемно-регистрирующей аппаратуры «ОМАР-2м», обеспечивающей усиление, аналого-цифровое преобразование и запись широкополосных геофизических сигналов в реальном масштабе времени [10]. Измерения велись в частотном диапазоне 100–10 000 Гц двумя способами:

- последовательные наблюдения электрических составляющих E_x , E_y с помощью заземленных линий и ортогональных им магнитных компонент H_x , H_y в течение 2–3 мин по каждому направлению;
- экспресс-измерения на стелющуюся незаземленную линию вдоль профиля E_y и магнитный датчик H_x поперек профиля, а затем на ортогональную пару магнитных датчиков H_x , H_y по 20–30 с.

Магнитные компоненты измерялись с помощью активных магнитных датчиков индукционного типа с линеаризованной амплитудно-

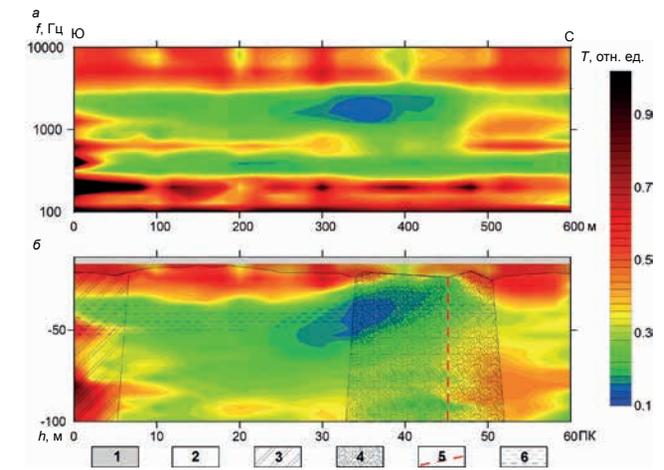


Рисунок 2. Вертикальные разрезы типпера. а – частотный псевдоразрез; б – глубинный разрез T . Условные обозначения соответствуют описанию к рис. 1.

но-частотной характеристикой и изменяемой чувствительностью [11]. Заземленные электрические линии MN составляли в длину 20 м, незаземленная стелющаяся симметричная антенна – 10 м. Измерения двумя способами дали возможность сравнить АМТ-данные, получаемые в основном режиме и в экспресс-варианте. Как и ожидалось, экспрессные измерения обладают более низким соотношением сигнал/шум и худшим разрешением, однако повторяют все характерные особенности и аномалии основных наблюдений. Так как результаты измерений не имеют существенных различий, дальнейшие выкладки и построения разрезов приведены только для экспресс-зондирования.

Камеральная обработка аудиоманнитотеллурических данных включала:

- фильтрацию промышленных помех;
- получение частотных спектров на основе быстрого преобразования Фурье;
- восстановление истинных амплитуд сигналов с учетом амплитудно-частотной характеристики измерительных каналов;
- расчет продольного импеданса среды Z ;
- расчет кажущегося сопротивления КС и получение частотного псевдоразреза $\rho_k(f)$;
- трансформацию частотной зависимости $\rho_k(f)$ в глубинный разрез КС $\rho_k(h)$ с помощью оригинального способа преобразования АМТ-данных с учетом априорной информации;
- пересчет и построение глубинного разреза кажущейся продольной проводимости $S_k(h)$;
- построение вертикальных разрезов магнитовариационных отношений;
- одномерную 1D-инверсию АМТЗ по программе МГУ IPI2WinMT [12];
- двумерную 2D-инверсию АМТЗ по программе Каминского ZondMT2d [13];
- построение количественных геоэлектрических разрезов АМТЗ.

Дополнительные работы методом ВЭЗ проводились комплектом аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург) на частоте 4,88 Гц по стандартной методике [14]. Использовалась симметричная четырехэлектродная установка Шлюмберже ($AMNB$) с выносом питающих электродов $AB/2$ на расстояние от 2 до 150 м с логарифмическим шагом. Измерения проводились при стабилизированном токе в питающей линии от 5 до 50 мА. Погрешность полевых измерений составила менее 3 %. Количественная интерпретация результатов ВЭЗ выполнена в рамках одномерной и двумерной модели по программам Каминского ZondIP и ZondRes2D.

Результаты исследований

Как уже отмечалось в графе обработки, частотный псевдоразрез КС, полученный в результате зондирования с незаземленной электрической линией (рис. 1, а), был трансформирован в глубинный разрез кажущейся продольной проводимости (рис. 1, б).

На всех представленных разрезах выделяются основные черты геологического строения. Так, положение области трещиноватости в габбро ПК0–ПК6 отмечается аномалиями пониженных величин кажущихся сопротивлений (рис. 1, а) и повышенными значениями продольной проводимости (рис. 1, б). Четкой аномалией электропроводности выделяется глубинный разлом (ПК45) с зоной дробления ПК34–ПК50, а также прослеживается протяженная умеренно проводящая зона на глубине 30–40 м, фиксирующая известный горизонт трещинных вод. Качественная интер-

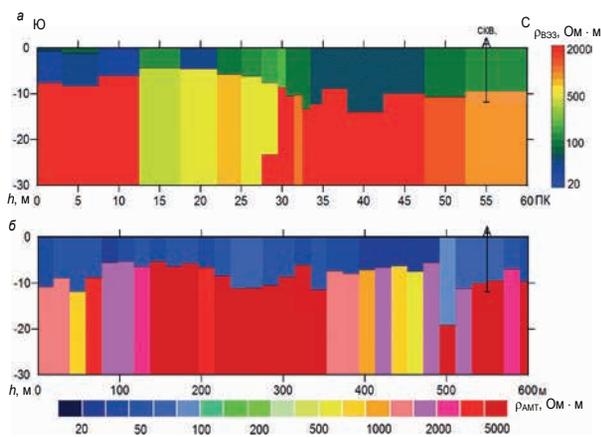


Рисунок 3. Результаты одномерной (1D) инверсии по контрольному профилю: геоэлектрические разрезы ВЭЗ – а и АМТЗ – б.

претация адекватно визуализирует разрез, что можно использовать для оценки смены геологической обстановки и присутствия подземных вод.

Важными физическими показателями естественного электромагнитного поля являются магнитовариационные параметры. Существует даже отдельный метод магнитовариационного профилирования (МВП), который применяется в практике магнитотеллурических работ для обнаружения аномалий электропроводности. С помощью магнитовариационных параметров можно определить направление на проводящее тело и суммарную продольную проводимость аномального объекта [15]. Функциями отклика среды в методе МВП являются реальный и мнимый индукционные векторы, а также амплитуда и фаза типпера. Отличительной способностью магнитовариационных функций отклика является их высокая чувствительность к наличию аномальных проводящих объектов в широком диапазоне глубин. Имеется множество удачных примеров применения индукционных векторов при поисках различных месторождений полезных ископаемых [16, 17]. Использование амплитудных характеристик типпера распространено не так широко из-за меньшей однозначности и наглядности. Типпер рассчитывается по трем ортогональным компонентам магнитного поля [18]:

$$T = \sqrt{\left(\frac{H_z}{H_x}\right)^2 + \left(\frac{H_z}{H_y}\right)^2}$$

Для повышения информативности качественной интерпретации АМТЗ практикуется построение вертикальных разрезов типпера или отдельных магнитовариационных отношений как по оси частот (рис. 2, а), так и в виде глубинного разреза, получаемого в результате трансформации (рис. 2, б).

Как видно из рис. 1, 2, на вертикальных разрезах типпера T хорошо проявляется аномальный эффект, связанный с горизонтом трещинных вод. Минимальные значения T могут свидетельствовать о повышенной водонасыщенности горных пород. Наклонное положение аномальной зоны подтверждается результатами ранее проведенных дистанционных индукционных зондирований. По результатам ДИЗ, аномалия эффективной продольной проводимости выделяется вблизи поверхности на ПК45 и далее падает на юг под тем же углом, что и аномалия типпера, фактически являясь ее продолжением. Это еще раз подтверждает прямую связь магнитовариационных параметров естественного поля Земли с электропроводностью разреза. Результаты изучения составляющих переменного магнитного поля показали, что магнитовариационные отношения H_z/H_x и H_z/H_y гораздо меньше отличаются друг от друга, чем отношения горизонтальных компонент импеданса. По-видимому, они меньше реагируют на анизотропные свойства разреза. Это дает возможность при экспресс-съемке проводить измерение только двух компонент переменного магнитного поля для вычисления одного магнитовариационного отношения.

Как уже отмечалось, ранее на контрольном профиле были проведены вертикальные электрические зондирования. Дополнительно к этому, отдельные точки подверглись повторным измерениям, а в некоторых местах профиля проведена детализация. Результаты одномерной интерпретации ВЭЗ указывают на преимущественно двухслойное строение геоэлектрического разреза (рис. 3, а). Задавшись двухслойной горизонтально-слоистой моделью среды, включающей рыхлые отложения и коренные породы, рассчитали количественный геоэлектрический разрез АМТЗ (рис. 3, б).

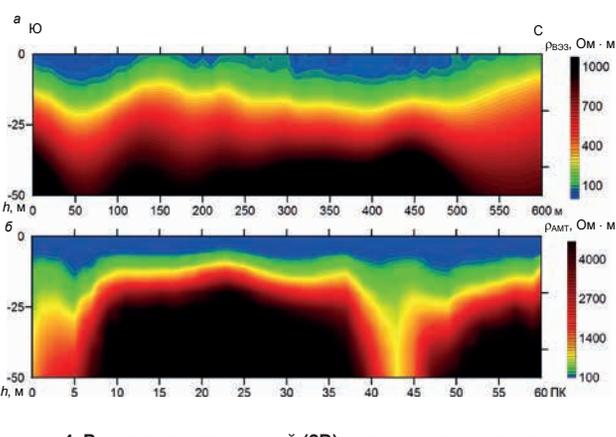


Рисунок 4. Результаты двумерной (2D) инверсии по контрольному профилю: геоэлектрические разрезы ВЭЗ – а и АМТЗ – б.

Следует отметить, что мощность рыхлых отложений, определенная по ВЭЗ и другим геофизическим методам, хорошо согласуется с количественными результатами АМТЗ, разница в вычислении положения границы в среднем составляет 4–8 %. Инженерно-геологическая скважина, пробуренная на ПК55, показала глубину до коренных пород 9,5 м и подтверждает правильность количественной интерпретации. В то же время геоэлектрические разрезы ВЭЗ и АМТЗ существенно отличаются друг от друга по величинам и вариациям удельных электрических сопротивлений (УЭС). Величина УЭС по двум методам может отличаться в 2–3 раза для рыхлых отложений и еще больше для коренных пород. Это объясняется различием физических процессов с участием постоянных и вихревых токов в двухфазной среде, состоящей из непроводящего минерального скелета и порового пространства, частично заполненного водой. Можно вспомнить, что методы сопротивлений (в том числе ВЭЗ) хорошо работают в проводящих средах, а индукционные (АМТЗ) – в изоляторах. Таким образом, результаты количественной интерпретации ВЭЗ более достоверны для рыхлых низкоомных образований, а геоэлектрический разрез АМТЗ более точен в отношении коренных пород. Подтверждением этому является разная реакция двух методов на известное тектоническое нарушение в интервале ПК40–ПК50: ВЭЗ отмечает увеличение мощности рыхлых отложений, а АМТЗ – уменьшение УЭС коренных пород (рис. 3, а, б).

С появлением программ двумерной (2D) инверсии данных появилась возможность вывести количественную интерпретацию электроразведочных данных на новый уровень. Геоэлектрические 2D-разрезы ВЭЗ и АМТЗ по контрольному профилю ИГФ рассчитаны и построены с помощью программ Каминского ZondRes2D и ZondMT2D (рис. 4).

Можно еще раз убедиться в том, что вертикальные электрические зондирования обладают слабой контрастностью в отношении высокоомных коренных пород, являющихся изолятором для электрического тока. ВЭЗ даже не фиксирует присутствие разлома, прекрасно выделяющегося на аудиоманнитотеллурическом разрезе в районе ПК43 (рис. 4, а, б). Верхняя часть геоэлектрических разрезов ВЭЗ и АМТЗ выглядит похожим образом, на обоих разрезах замечена депрессия в начале профиля, приуроченная к ослабленным грунтам.

Несмотря на то что двумерный разрез АМТЗ выглядит довольно правдоподобно и отображает основные геологические структуры, на нем не видно горизонта трещинных вод, определяемого на качественных разрезах продольной проводимости и типпера (рис. 1, 2). Это приводит к заключению, что количественная интерпретация, основанная на подборе подходящей геолого-геофизической модели, не всегда может корректно отобразить разрез в соответствии с решаемой задачей. Поэтому использование качественных разрезов кажущихся параметров, получаемых прямым пересчетом, не только возможно, но порой и необходимо для получения более полной картины.

Выводы

Выполненные исследования показали, что аудиоманнитотеллурические данные, получаемые в основном режиме и в варианте экспрессных измерений, не имеют существенных различий. Регистрируемая информация содержит сведения об изменении электрических свойств разреза с глубиной, что позволяет строить качественные разрезы электромагнитных параметров и количественные геоэлектрические разрезы.

Сопоставление результатов обработки аудиоманнитотеллурических экспресс-зондирований с имеющейся геолого-геофизической информацией показало хорошую сходимость как в случае 1D–2D-инверсии, так и в случае качественных построений трансформированных разрезов аудиоманнитотеллурических и магнитовариационных параметров. Отме-

чено, что на разных типах разрезов выделяются различные особенности. Для повышения информативности зондирований рекомендуется применение всех возможных вариантов построений.

Использование экспресс-варианта АМТЗ с быстрой интерпретацией в полевых условиях позволяет значительно повысить производительность электромагнитных методов исследований при поисково-разведочных, инженерно-геологических и гидрогеологических работах.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект № 15-2-5-31.

Автор выражает благодарность сотрудникам Института геофизики УрО РАН Федоровой О. И., Горикову В. Ю. и Маликову А. В. за предоставление полевых материалов по вертикальным электрическим зондированиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сараев А. К., Анташук К. М. Возможности аудиоманнителлурических зондирований при поисках кимберлитовых трубок // Геофизика. 2011. № 4. С. 36–43.
2. Куликов В. А., Яковлев А. Г. Практическое применение магнитотеллурических методов в рудной геофизике // Разведка и охрана недр. 2011. № 3. С. 26–33.
3. Li X., Li Y., Meng X., Carlson N., Feast C., Bushner G. The use of CSAMT and NSAMT in siting groundwater production wells: two case histories // International Workshop on Gravity, Electrical & Magnetic Methods and Their Applications. Beijing, China, October 10–13, 2011. P. 23–25.
4. Анташук К. М., Сараев А. К. МТ–АМТ–зондирования при поисках геотермальных месторождений в северо-западной части полуострова Камчатка // Геофизика. 2013. № 3. С. 45–51.
5. Blake S., Jones A. G., Henry T., Kalscheuer T. A multi-disciplinary investigation of Irish warm springs and their potential for geothermal energy provision // Proceedings World Geothermal Congress (Melbourne, Australia, 19–25 April 2015). P. 1–11.
6. Abdellatif Younis, Gad El-Qady, Mohamed Abd Alla et al. AMT and CSAMT methods for hydrocarbon exploration at Nile Delta, Egypt // Arabian Journal of Geosciences. 2015. Vol. 8, issue 4. P. 1965–1975.
7. Давыдов В. А. Аудиоманнителлурическая съемка в движении // Геофизика. 2014. № 2. С. 47–53.
8. Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
9. Carlson N., Paski P., Urquhart S. Applications of Controlled Source and Natural Source Audio-Frequency Magnetotellurics to Groundwater Exploration // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. 2005. P. 585–595.
10. Давыдов В. А. Опытная малогабаритная аппаратура регистрации «ОМАР-2м» для метода АМТЗ // Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей: материалы конф. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2011. С. 112–115.
11. Давыдов В. А. Эквивалентные схемы и основные характеристики различных датчиков электромагнитных сигналов в широкой полосе частот // Уральский геофизический вестник. 2014. № 1 (23). С. 46–54.
12. IPI2Win(MT) User manual. Moscow: MSU, 2002. 15 p.
13. Каминский А. Е. Zond-программы для геофизики. URL: <http://zond-geo.ru/software>
14. Рейхерт Л. А. Инструкция по электроразведке: наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэро-электроразведка, морская электроразведка. Л.: Недра, 1984. 352 с.
15. Рокитянский И. И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наук. думка, 1975. 286 с.
16. Алексеев Д. А., Куликов В. А., Яковлев А. Г. и др. Опыт применения метода АМТЗ при поисках полезных ископаемых // Разведка и охрана недр. 2004. № 5. С. 40–44.
17. Куликов В. А., Яковлев А. Г. Возможности МТ методов при проведении работ на высокоомных разрезах // Разведка и охрана недр. 2008. № 12. С. 3–6.
18. Ермолин Е. Ю., Ингеров А. И. Пятикомпонентные измерения МТЗ для оценки параметров 2D аномальных тел, находящихся вне профиля измерений // Проблемы недропользования. 2014. Вып. 2. С. 13–19.

REFERENCES

1. Saraev A. K., Antashuk K. M. 2011, *Vozможности audiomagnitotellurgicheskikh zondirovaniy pri poiskakh kimmerlitovykh trubok* [Capabilities of AMT sounding during searching of kimberlite pipes]. *Geofizika* [Russian geophysics]. No. 4, pp. 36–43.
2. Kulikov V. A., Yakovlev A. G. 2011, *Prakticheskoe primeneniye magnetotellurgicheskikh metodov v rudnoi geofizike* [Practical application of magnetotelluric methods in mining geophysics]. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources]. No. 3. pp. 26–33.
3. Li X., Li Y., Meng X., Carlson N., Feast C., Bushner G. 2011, The use of CSAMT and NSAMT in siting groundwater production wells: Two case histories. International Workshop on Gravity, Electrical & Magnetic Methods and Their Applications, Beijing, China, October 10–13, pp. 23–25.
4. Antashuk K. M., Saraev A. K. 2013, *MT-AMT-zondirovaniya pri poiskakh geotermalnykh mestorozhdeniy v severo-zapadnoi chasti poluostrova Kamchatka* [AMT-soundings when searching for geothermal fields in north-western part of Kamchatka peninsula]. *Geofizika* [Russian geophysics]. No. 3. pp. 45–51.
5. Blake S., Jones A. G., Henry T., Kalscheuer T. A. 2015, Multi-Disciplinary Investigation of Irish Warm Springs and Their Potential for Geothermal Energy Provision. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19–25 April, pp. 1–11.
6. Abdellatif Younis, Gad El-Qady, Mohamed Abd Alla, et al. 2015, AMT and CSAMT 1965–1975, methods for hydrocarbon exploration at Nile Delta, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 8, Issue 4, pp. 1965–1975.
7. Davydov V. A. 2014, *Audiomagnitotelluricheskaya syemka v dvizhenii* [Audio-magnetotelluric survey in motion]. *Geofizika* [Russian geophysics]. No. 2. pp. 47–53.
8. Berdichevskiy M. N., Dmitriev V. I. 2009, *Modeli i metody magnitotelluriki* [Models and methods of magnetotellurics]. Moscow, 680 p.
9. Carlson, N., Paski, P., Urquhart, S. 2005, Applications of Controlled Source and Natural Source Audio-Frequency Magnetotellurics to Groundwater Exploration. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. pp. 585–595.
10. Davydov V. A. 2011, *Opytnaya malogabaritnaya apparatura registratsii "OMAR-2m" dlya metoda AMTZ* [Exploratory portable registration equipment «OMAR-2m» for AMTZ method]. *Geodinamika. Glubinnoe stroenie. Teplovoe pole Zemli. Interpretatsiya geofizicheskikh poley* [Geodynamics. Deep structure. Thermal field of Earth. Interpretation of geophysical fields] *Shestyye nauchnye chteniya Y. P. Bulashevicha: materialy konferentsii* [Sixth science readings Y. P. Bulashevich: Conference materials]. Ekaterinburg, pp. 112–115.
11. Davydov V. A. 2014, *Ekvivalentnye skhemy i osnovnyye kharakteristiki razlichnykh datchikov elektromagnitnykh signalov v shirokoy polose chastot* [Equivalent circuits and main characteristics of various detectors of electrical magnetic signals in a wide frequency band]. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik* [Ural geophysical bulletin]. No. 1 (23). pp. 46–54.
12. 2002, IPI2Win(MT) User Manual. Moscow. 15 p.
13. Kaminskiy A. E. *Zond-programmy dlya geofiziki* [Programs for geophysics]. URL: <http://zond-geo.ru/software>
14. 1984, *Instruktsiya po elektrorazvedke* [Instruction on electrical exploration]. Leningrad, 352 p.
15. Rokiyatskiy I. I. 1975, *Issledovaniye anomalii elektroprovodnosti metodom magnitovariatsionnogo profilirovaniya* [Research of electrical conduction abnormalities with the method of geomagnetic-variation profiling]. Kiev, 286 p.
16. Alekseev D. A., Kulikov V. A., Yakovlev A. G. et al. 2004, *Opyt primeneniya metoda AMTZ pri poiskakh poleznykh iskopaemykh* [Case history of using AMT sounding method when searching for mineral resources]. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources]. No. 5. pp. 40–44.
17. Kulikov V. A., Yakovlev A. G. 2008, *Vozможности МТ методов pri provedenii rabot na vysokoomnykh razrezakh* [Capabilities of MT methods during conducting of work at resistive structures]. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources]. No. 12. pp. 3–6.
18. Ermolin E. Y., Ingerov A. I. 2014, *Pyatikomponentnye izmereniya MTZ dlya otsenki parametrov 2D anomalnykh tel, nakhodyashikhsya vne profilya izmereniy* [Quinary measurements of MT sounding for evaluation of 2D parameters of anomaly bodies that are located outside the measurement profile]. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of subsurface resources management]. Issue 2. Ekaterinburg, pp. 13–19.

Вадим Анатольевич Давыдов,
davyde@yandex.ru
Институт геофизики УрО РАН
Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100

Vadim Anatol'evich Davydov,
davyde@yandex.ru
Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS
Ekaterinburg, Russia